

耀变体的逆康普顿峰值频率与伽马光子谱指数的关系*

庾满先^{1,2} 杨江河^{1,2,3†} 张月莲^{1,2} 汪胜辉^{1,2} 聂建军^{1,2} 樊军辉^{3‡}

(1 湖南文理学院数理学院 常德 415000)

(2 光电信息集成与光学制造技术湖南省重点实验室 常德 415000)

(3 广州大学天体物理中心 广州 510006)

摘要 以Fermi/LAT (Large Area Telescope) 12 yr观测的第4期源表的第3次修订版(The 4th Fermi Gamma-ray LAT-Data Release 3, 4FGL-DR3)中的blazar为样本, 研究了blazar不同子类的逆康普顿峰频($\lg \nu_p^{\text{IC}}$)与 γ -ray光子谱指数(Γ)之间关系. 结果表明: 所有blazar子类样本的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 都有强的负相关关系, 即 γ -ray光子谱指数对blazar的逆康普顿能谱有强的主导作用, 并且可用二者之间的关系快速地估计逆康普顿峰频; 不同blazar子类样本的逆康普顿部分的能谱分布应该有不同的谱结构函数, 因此, 对于不同的样本, 应该采用不同的函数拟合其能谱分布.

关键词 星系: 活动, 星系: 核, 类星体: 普通, 蝎虎天体: 普通, 伽马射线: 星系, 方法: 统计学
中图分类号: P157; **文献标识码**: A

1 引言

耀变体(Blazar)是活动星系核(Active Galactic Nucleus, AGN)的一个子类, 具有一些极端的观测性质, 如快速且大幅的光变、高偏振、视超光速运动、高能 γ -ray辐射等. 目前, 对blazar的这些极端观测性质的物理原因还不是十分清楚, 特别是其高能 γ -ray辐射机制. 按发射线的不同, blazar分为平谱射电源(Flat Spectral Radio Quasar, FSRQ)和蝎虎天体(BL Lacertae object, BL Lac)^[1-3]. Blazar从射电到 γ -ray波段都有强的电磁波辐射, 其全波段能谱分布(Spectral Energy Distribution,

SED)有两个峰, 一个在低能波段, 另一个在高频 γ -ray波段^[3-8]. 目前研究认为, 在低能波段的峰由同步辐射(Synchrotron radiation, Syn)产生, 称为同步峰; 位于高能波段的峰主要由逆康普顿辐射(Inverse Compton radiation, IC)产生, 称为逆康普顿峰^[9-12]. 能谱结构及其参数对理解blazar的辐射性质有重要帮助. SED的双峰参数包括谱曲率、峰值频率和峰值流量或光度, 这些参数一般通过拟合SED获得^[4, 6-8, 13-20].

在 γ -ray波段, 伽马光子谱指数也是反映blazar高能辐射谱性质的重要参数, 那么谱指数与峰频

2023-08-11收到原稿, 2023-10-16收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12433004、U2031112、U2031201), 湖南省教育厅研究基金项目(20C1273), 广东省基础与应用基础研究重大项目(2019B030302001)和中国载人航天工程科学研究项目(CMS-CSST-2021-A06)资助

[†]yjh2019@huas.edu.cn

[‡]fjh@gzhu.edu.cn

存在怎样的关系, 对于不同的blazar子类有怎样的差异? 为了回答这个问题, 本文将以Fermi/LAT (Large Area Telescope) 12 yr观测的第4期源表的第3次修订版(The 4th Fermi Gamma-ray LAT-Data Release 3, 4FGL-DR3)^[21]中的blazar为样本, 研究不同类型blazar的逆康普顿峰频与伽马射线光子谱指数的关系. 以此讨论不同类型天体的一些性质, 及逆康普顿峰频的一些简单估计方法. 本文中频率 ν 处的流量密度 f_ν 与谱指数 α 关系为 $f_\nu \propto \nu^{-\alpha}$.

2 样本

Fermi/LAT最新释放的 γ -ray数据表4FGL-DR3是第四版源全目录的增量版本. 4FGL-DR3中共有3743个blazar, 其中有794个FSRQ、1432个BL Lac和1517个BCU (Blazar Candidates of Uncertain type)^[21]. Yang等^[18]根据4FGL-DR3中给出的8能段 γ -ray数据, 用抛物线方程 $\lg(\nu f_\nu) = P_4(\lg \nu - P_5)^2 + P_6$ 拟合了4FGL-DR3 blazar高能部分的SED, 得到了4FGL-DR3中全部3743个blazar的逆康普顿峰参数, 即谱曲率(P_4)、峰值频率(P_5 , $\lg \nu_p^{\text{IC}}$)、峰流量(P_6 , $\lg(\nu_p^{\text{IC}} f_{\nu_p^{\text{IC}}})$)以及峰光度($\lg L_p^{\text{IC}}$). 该研究还将贝叶斯方法用于逆康普顿峰值频率, 对blazar按逆康普顿峰频进行了分类, 将 $\lg(\nu_p^{\text{IC}}/\text{Hz}) \leq 22.9$ 的源分为低逆康普顿峰频blazar (Low Inverse Compton peak frequency, LCP), $\lg(\nu_p^{\text{IC}}/\text{Hz}) > 22.9$ 的分为高逆康普顿峰频blazar (High Inverse Compton peak frequency, HCP).

Yang等^[17]依据NED (NASA/IPAC (National Aeronautics and Space Administration/Infrared Processing and Analysis Center) Extragalactic Database)中的射电、光学及X-ray数据, 用抛物线方程 $\lg(\nu f_\nu) = P_1(\lg \nu - P_2)^2 + P_3$ 拟合了4FGL-DR3 blazar低能部分的SED, 得到了2709个

blazar的同步辐射峰参数, 即谱曲率(P_1)、同步辐射峰值频率(P_2 , $\lg \nu_p^{\text{Syn}}$)、峰流量(P_3 , $\lg(\nu_p^{\text{Syn}} f_{\nu_p^{\text{Syn}}})$)以及同步辐射峰光度($\lg L_p^{\text{Syn}}$). 该研究同时也给出了blazar按同步峰频的分类: 高同步峰频 (High Synchrotron Peak, HSP) blazar; 中同步峰频 (Intermediate Synchrotron Peak, ISP) blazar; 低同步峰频 (Low Synchrotron Peak, LSP) blazar. BL Lac按同步峰频的分类: 高同步峰频BL Lac (High synchrotron peak BL Lac, HBL); 中同步峰频BL Lac (Intermediate synchrotron peak BL Lac, IBL); 低同步峰频BL Lac (Low synchrotron peak BL Lac, LBL).

本文将以4FGL-DR3中的blazar为样本, 研究blazar不同子类的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 γ -ray光子谱指数(Γ)的关系, 因此, 研究所需数据包括blazar的分类(FSRQ、BL Lac、BCU、HBL、IBL、LBL、HCP、LCP), $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 及 Γ . 样本分类HBL、IBL、LBL、HCP、LCP及 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 来自文献[17–18]; 样本分类FSRQ、BL Lac、BCU及 Γ 来自4FGL-DR3^[21].

3 结果

利用文献[17–18]和[21]中获得的样本分类、 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 及 Γ , 不同子类blazar样本的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 之间的关系如图1所示. 对图1中各样本的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 之间关系做线性回归, 得 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 的详细关系如表1所示, 得到的拟合方程表示为 $\lg \nu_p^{\text{IC}} = k \cdot \Gamma + b$, 式中 k 为斜率, b 为截距. 表1中, n 为样本量, r 为相关系数, p 为机会概率.

注意, 尽管本文给出了关于BCU和IBL样本的一些结果, 但在后续的讨论中, 没有考虑BCU和IBL样本, 因为BCU是未知类型的blazar, 由FSRQ和BL Lac组成, 其统计性质与总样本的类似^[18, 22]. IBL是HBL和LBL的中间状态, 性质介于二者之间^[7].

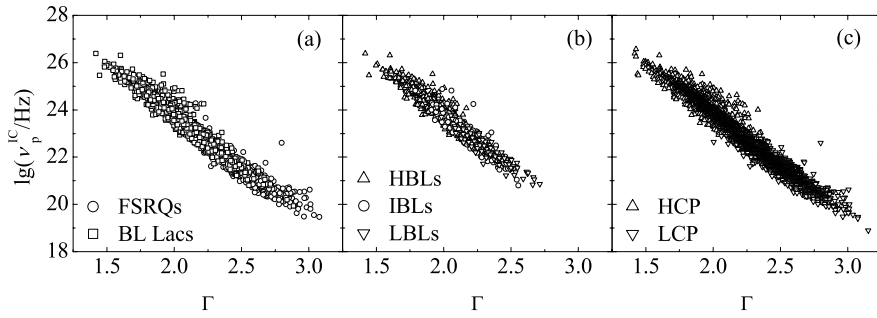


图 1 不同子类blazar样本的逆康普顿峰频与伽马光子谱指数的关系. (a)总样本、FSRQ及BL Lac样本; (b) HBL、IBL及LBL样本; (c) HCP和LCP样本.

Fig. 1 The correlations between the inverse Compton peak frequency and γ -ray photon spectral index for different subclass sample of blazars. (a) Total, FSRQ, and BL Lac samples; (b) HBL, IBL, and LBL samples; (c) HCP and LCP samples.

表 1 Blazar各子类样本的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 之间关系的线性拟合结果

Table 1 Linear fitting results of the correlation between $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ and Γ for subclass sample of blazars

Sam.	n	r	p	Fitted Eq. ($\lg \nu_p^{\text{IC}} = k \cdot \Gamma + b$)	Eq. Code
Total	3743	-0.979	< 0.0001	$\lg \nu_p^{\text{IC}} = -(4.398 \pm 0.015)\Gamma + (32.589 \pm 0.034)$	Eq (Total)
FSRQ	794	-0.948	< 0.0001	$\lg \nu_p^{\text{IC}} = -(3.965 \pm 0.047)\Gamma + (31.444 \pm 0.117)$	Eq (FSRQ)
BL Lac	1432	-0.965	< 0.0001	$\lg \nu_p^{\text{IC}} = -(4.506 \pm 0.032)\Gamma + (32.821 \pm 0.066)$	Eq (BL Lac)
HBL	670	-0.922	< 0.0001	$\lg \nu_p^{\text{IC}} = -(4.356 \pm 0.071)\Gamma + (32.556 \pm 0.135)$	Eq (HBL)
IBL	340	-0.920	< 0.0001	$\lg \nu_p^{\text{IC}} = -(4.542 \pm 0.105)\Gamma + (32.855 \pm 0.230)$	Eq (IBL)
LBL	132	-0.942	< 0.0001	$\lg \nu_p^{\text{IC}} = -(3.884 \pm 0.121)\Gamma + (31.347 \pm 0.280)$	Eq (LBL)
HCP	1503	-0.917	< 0.0001	$\lg \nu_p^{\text{IC}} = -(4.103 \pm 0.042)\Gamma + (32.070 \pm 0.083)$	Eq (HCP)
LCP	2240	-0.949	< 0.0001	$\lg \nu_p^{\text{IC}} = -(3.817 \pm 0.028)\Gamma + (31.114 \pm 0.070)$	Eq (LCP)

4 讨论

4.1 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 的拟合关系

从 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 关系的拟合结果(图1、表1)可知, 所有blazar子类样本的逆康普顿峰频与 γ -ray光子谱指数都有强反相关关系, 相关系数在 $-0.91 \sim -0.98$ 之间, 机会概率均小于 10^{-4} . 其实, 一些作者用较小的样本也研究了blazar的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 的关系, 如: Abdo等^[4]计算了48个亮blazar的SED, 分析了逆康普顿峰频与光子谱指数的关系, 得到 $\lg \nu_p^{\text{IC}} = -4.0\Gamma + 31.6$; 对于一个有69个TeV BL Lac的样本, Lin等^[23]得到 $\lg \nu_p^{\text{IC}} = -4.59\Gamma + 32.67$; 对于一个LSP blazar样本, Arsioli等^[24]得到 $\Gamma = -0.229 \lg \nu_p^{\text{IC}} + 7.34$. 经比较不难发现, 本文结果与文献结

果是完全一致的.

由于谱指数是谱的重要参数, 因此, 其与SED参数(谱曲率、峰频、峰流量或峰光度)之间存在相关是可预期的. 汪胜辉等^[22]发现射电谱指数与同步辐射谱的特征参数—谱曲率有良好的正相关关系, 并得到射电辐射对LBL、FSRQ、HBL的同步辐射谱的影响依次减弱. 本文结果显示, $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 有强的负相关, 该结果表明, γ -ray光子谱指数对blazar的逆康普顿能谱有强的主导作用, γ -ray谱越陡, 逆康普顿峰频越低. 不同子类blazar样本的这种相关性没有显著的差异, 但从表1结果我们还是可以看出, 峰频较高样本的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 相关的斜率 k 的绝对值也较大(表1), 如 $|k|_{\text{BL Lac}} > |k|_{\text{FSRQ}}$, $|k|_{\text{HBL}} > |k|_{\text{LBL}}$, $|k|_{\text{HCP}} > |k|_{\text{LCP}}$, 此处下标表示对

应天体的斜率,也就是说斜率与峰频之间应存在反相关关系.

4.2 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 的理论关系

从 γ -ray 积分能谱 ($\lg f_\nu - \lg \nu$) 的物理意义及本文对谱指数的定义可知, γ -ray 谱指数 $\alpha_\gamma = -\frac{d(\lg f_\nu)}{d(\lg \nu)}$. 由于 4FGL-DR3 中给出的 γ -ray 光子谱指数 (Γ) 也采用了与本文一致的谱指数定义, 因此有 $\Gamma = \alpha_\gamma + 1$, 即 $\frac{d(\lg f_\nu)}{d(\lg \nu)} = 1 - \Gamma$. 文献[18]用抛物线方程 $\lg(\nu f_\nu) = P_4(\lg \nu - P_5)^2 + P_6$ 拟合了逆康普顿部分的 SED. 显然, 式中, P_4 、 P_5 、 P_6 分别为逆康普顿部分的谱曲率、峰频和峰流量. 结合方程 $\frac{d(\lg f_\nu)}{d(\lg \nu)} = 1 - \Gamma$ 与 $\lg(\nu f_\nu) = P_4(\lg \nu - P_5)^2 + P_6$ 可得

$$P_5 = \frac{\Gamma}{2P_4} + \left(\lg \nu - \frac{1}{P_4} \right). \quad (1)$$

由于 P_4 恒小于 0, 所以, 由 (1) 式可知, 逆康普顿

峰频 ($P_5, \lg \nu_p^{\text{IC}}$) 与 γ -ray 光子谱指数 (Γ) 反相关, 该结果与拟合结果一致. 由 (1) 式还可知, $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 关系斜率的理论值 (k_T) 与截距 (b_T) 的理论值分别为

$$k_T = \frac{1}{2P_4}, \quad (2)$$

$$b_T = \lg \nu - \frac{1}{P_4}. \quad (3)$$

对于某个子类 blazar 样本, 若其逆康普顿谱曲率的平均值为 $\overline{P_4}$, 逆康普顿峰频的平均值为 $\overline{\lg \nu_p^{\text{IC}}}$, 将 (2) 式、(3) 式中的 P_4 和 $\lg \nu$ 分别用 $\overline{P_4}$ 和 $\overline{\lg \nu_p^{\text{IC}}}$ 代入即可得到该子类 blazar 样本 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 关系的理论斜率 (k_T) 与截距 (b_T). 根据本文样本, 我们计算了各 blazar 子类样本的逆康普顿谱曲率及峰频的平均值 (表 2), 根据 (2) 式和 (3) 式计算了各子类样本的理论斜率 (k_T) 与截距 (b_T), 结果见表 2.

表 2 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 关系斜率与截距的理论值和拟合值

Table 2 Theoretical and fitted values of the slope and intercept of the relationship between $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ and Γ

Sam.	n	$\overline{P_4}$	$\overline{\lg \nu_p^{\text{IC}}}$	k_T	b_T	k	b
Total	3743	-0.134 ± 0.038	22.83 ± 1.34	-3.72	30.27	-4.40	32.59
FSRQ	794	-0.129 ± 0.029	21.65 ± 0.84	-3.88	29.42	-3.97	31.44
BL Lac	1432	-0.135 ± 0.041	23.66 ± 0.99	-3.70	31.06	-4.51	32.82
HBL	670	-0.139 ± 0.041	24.23 ± 0.66	-3.59	31.42	-4.36	32.56
IBL	340	-0.125 ± 0.041	22.96 ± 0.66	-4.00	30.96	-4.54	32.85
LBL	132	-0.129 ± 0.034	22.41 ± 0.63	-3.87	30.14	-3.88	31.35
HCP	1503	-0.142 ± 0.044	24.05 ± 0.70	-3.53	31.11	-4.10	32.07
LCP	2240	-0.128 ± 0.032	21.79 ± 0.74	-3.89	29.57	-3.82	31.11

Note: k_T and b_T are theoretical values calculated by Eqs. (2) and (3), respectively. k and b were both obtained by fitting, as shown in Table 1.

从表 2 可知, blazar 各子类样本的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 关系斜率 (k_T) 和截距 (b_T) 的理论值与拟合值是基本一致的. 由抛物线方程得到 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 关系的斜率仅是谱曲率的函数, 即 $k_T = \frac{1}{2P_4}$. 辐射的 SED 谱并不是严格的抛物线谱, 也就是说, $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 关系的斜率不应仅是谱曲率的函数, 但我们还是可以相信 k_T 主要是受谱曲率的影响. 在上一节的分析中, 我们得到斜率与峰频有关, 即关系的斜率不仅与谱曲率有关还与峰频有关. 这应该是斜率的理论值与拟合值存

在差异的主要原因.

(1) 式是假设逆康普顿部分的 SED 为抛物线谱, 得到的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 及 P_4 的关系. 将总样本、FSRQ、BL Lac 及 BCU 样本的平均峰频代入 (1) 式, 并从文献[18]中获得 Γ 和 P_4 代入 (1) 式即可得到各样本的逆康普顿峰. 由 (1) 式计算得到的峰频与文献[18]给出峰频的关系如图 2 所示 (图中 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ by Eq. (1) 即由 (1) 式得到的逆康普顿峰), 线性拟合结果如表 3 所示, 线性拟合方程表示为 $y = (a \pm \Delta a) + (b \pm \Delta b)x$.

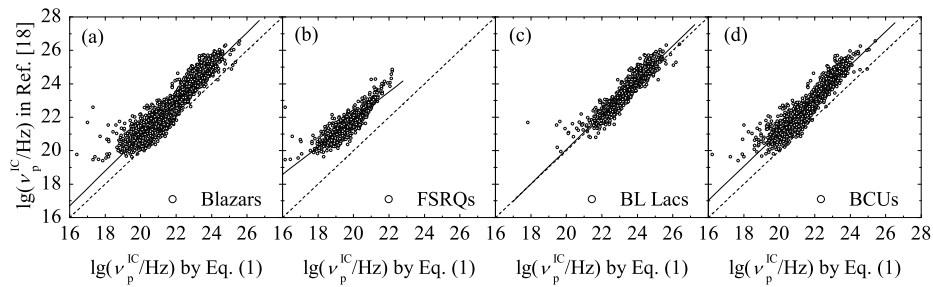


图 2 峰频的(1)式结果与文献[18]结果的比较. 图中实线为最佳线性拟合, 虚线为等值线. (a)、(b)、(c)和(d)分别为总样本、FSRQ、BL Lac及BCU样本.

Fig. 2 Comparison between the peak frequencies obtained from Eq. (1) and Ref. [18]. The solid line in the figure represents the best linear fit, while the dashed line represents the contour line. (a), (b), (c), and (d) are for Total, FSRQ, BL Lac, and BCU samples, respectively.

表 3 (1)式与文献[18]给出峰频关系的线性拟合结果

Table 3 The linear fitting results for the correlation between the peak frequencies obtained from Eq. (1) and Ref. [18]

Sam.	a	Δa	b	Δb	r	n	p
Blazars	0.133	0.131	1.036	0.006	0.943	3741	< 0.0001
FSRQs	5.402	0.331	0.823	0.017	0.868	794	< 0.0001
BL Lacs	-0.566	0.253	1.032	0.011	0.930	1432	< 0.0001
BCUs	0.906	0.222	1.008	0.010	0.930	1517	< 0.0001

从图2及表3可知, 由(1)式计算的峰频与文献[18]给出的峰频, 对于总样本、FSRQ、BL Lac及BCU样本都有很好的正相关关系, 相关系数在0.86–0.94之间, 机会概率均小于 10^{-4} . 特别是BL Lac样本, 拟合线与等值线接近重合(图2 (c)), 说明用(1)式计算的逆康普顿峰频与文献[18]给出的值有很好的-致性, 因此可用(1)式很好地估计BL Lac的逆康普顿峰频. 但从图2 (a)、(b)、(d)可看出, 总样本、FSRQ及BCU样本的拟合线位于等值线的左上侧, 并明显地偏离等值线, 说明用(1)式计算的逆康普顿峰频系统性地小于文献[18]给出的结果. 从前面的分析可知, 逆康普顿部分的SED并非严格的抛物线谱, 由此导致了用(1)式计算结果与文献[18]结果系统性的差异. 由图2 (a)、(b)、(d)进一步可看出, 各样本之间的这种系统性差异有不同, 说明不同样本的逆康普顿部分的SED可能有不

同的谱结构函数($\lg(\nu f_\nu) - \lg \nu$), 如果真是这样, 那么在拟合SED时, 对不同的样本, 我们应该采用不同的拟合函数, 如, 二次(抛物线方程)、三次、幂函数或它们的复合函数等.

4.3 逆康普顿峰频的快速估计方法

本文用blazar不同子类的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 关系方程(表1) Eq (Total)、Eq (FSRQ)、Eq (BL Lac)、Eq (HBL)、Eq (IBL)、Eq (LBL)、Eq (HCP)、Eq (LCP)分别估计了相关样本的逆康普顿峰频, 并将估计结果与文献[18]的结果进行了比较. 文献结果与估计结果的相关关系如图3所示, 线性拟合结果如表4所示, 拟合方程表示为 $y = (a \pm \Delta a) + (b \pm \Delta b)x$. 各子类blazar样本逆康普顿峰频的估计结果和拟合结果的平均值及Kolmogorov-Smirnov (KS)检验结果如表5所示. 表5中: 第(1)列, 样本; 第(2)列, 文献

[18]给出的逆康普顿峰频的平均值及标准差; 第(3)列, 本文估计结果的平均值及标准差; 第(4)列, 样本量; 第(5)列, 2个分布之间取得最大累积概率差时的逆康普顿峰频; 第(6)列, 2列分布的最大累积概率差; 第(7)列, 逆康普顿峰频的文献[18]结果与估计结果的2个分布来自相同分布的概率.

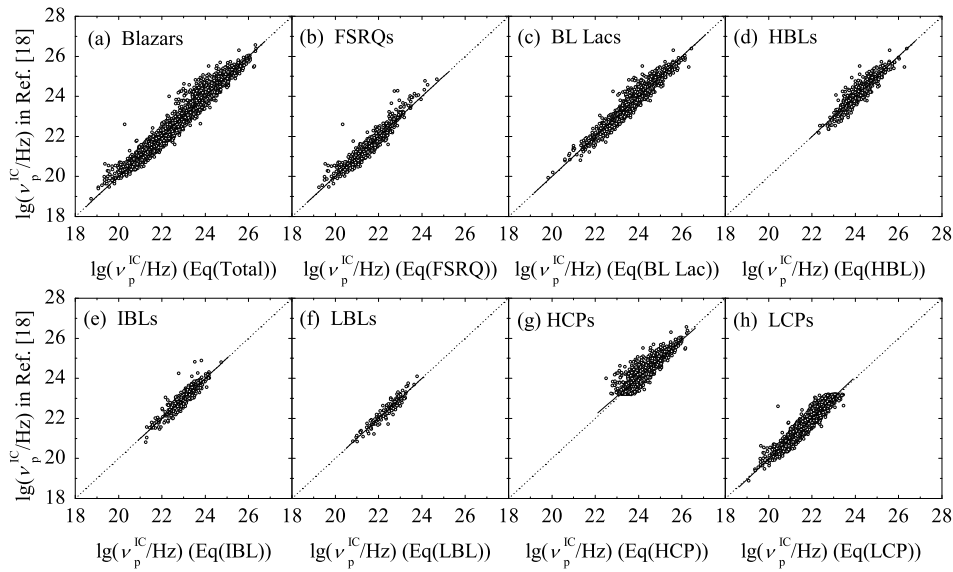


图 3 Blazar各子类样本的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 分别用公式Eq (Total)、Eq (FSRQ)、Eq (BL Lac)、Eq (HBL)、Eq (IBL)、Eq (LBL)、Eq (HCP)、Eq (LCP)估计的结果与文献[18]结果的比较. (a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)分别为总样本(Total)、FSRQ、BL Lac、HBL、IBL、LBL、HCP和LCP样本.

Fig. 3 Comparison of the results estimated by Eq (Total), Eq (FSRQ), Eq (BL Lac), Eq (HBL), Eq (IBL), Eq (LBL), Eq (HCP), and Eq (LCP) for subclass samples of blazars with the results of Ref. [18]. (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), and (h) are for Total, FSRQ, BL Lac, HBL, IBL, LBL, HCP, and LCP samples, respectively.

表 4 Blazar各子类样本逆康普顿峰频的文献值与估计值相关的线性拟合结果
Table 4 Linear fitting results of correlation between inverse Compton peak frequencies literature value and estimated value for subclass samples of blazars

Sam.	a	Δa	b	Δb	r	n	p	Estimation Eq. of $\lg \nu_p^{\text{IC}}$
Total	1.60×10^{-5}	0.078	1.000	0.003	0.979	3743	< 0.0001	Eq (Total)
FSRQ	-1.18×10^{-3}	0.259	1.000	0.012	0.948	794	< 0.0001	Eq (FSRQ)
BL Lac	-7.03×10^{-4}	0.170	1.000	0.007	0.965	1432	< 0.0001	Eq (BL Lac)
HBL	-2.44×10^{-3}	0.392	1.000	0.016	0.923	670	< 0.0001	Eq (HBL)
IBL	7.08×10^{-3}	0.532	1.000	0.023	0.920	340	< 0.0001	Eq (IBL)
LBL	2.77×10^{-3}	0.700	1.000	0.031	0.942	132	< 0.0001	Eq (LBL)
HCP	1.453	0.291	0.941	0.012	0.896	1503	< 0.0001	Eq (HCP)
LCP	-0.533	0.142	1.026	0.007	0.958	2240	< 0.0001	Eq (LCP)

表 5 文献及估计峰频的平均值及KS检验结果

Table 5 Average values of peak frequencies from literature and estimated, as well as KS test results

Sam.	$\lg \nu_p^{\text{IC}}$	$\lg \nu_p^{\text{IC}}$ (Estimated)	n	$\lg \nu_p^{\text{IC}}$	$d_{\text{max}}/\times 10^{-2}$	$P/(%)$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Total	22.83 ± 1.34	22.83 ± 1.31	3743	24.21	2.46	20.56
FSRQ	21.65 ± 0.84	21.65 ± 0.80	794	21.58	4.91	28.66
BL Lac	23.66 ± 0.99	23.66 ± 0.96	1432	23.24	3.35	39.12
HBL	24.23 ± 0.66	24.23 ± 0.61	670	24.76	3.73	73.17
IBL	22.96 ± 0.66	22.96 ± 0.61	340	23.09	4.71	83.73
LBL	22.41 ± 0.63	22.41 ± 0.60	132	22.92	6.82	90.92
HCP	24.19 ± 0.63	24.19 ± 0.57	1503	23.45	5.12	3.74
LCP	21.91 ± 0.81	21.91 ± 0.77	2240	22.82	5.54	0.20

从图3及表4可见, 用表1中的方程Eq (Total)、Eq (FSRQ)、Eq (BL Lac)、Eq (HBL)、Eq (IBL)、Eq (LBL)、Eq (HCP)和Eq (LCP)分别估计的相应blazar子类样本的逆康普顿峰频与文献[18]给出的值均有强正相关. 相关系数在0.90–0.98之间, 机会概率均小于 10^{-4} . 表5给出了blazar各子类样本估计结果与文献[18]结果的平均值及各子类样本之间峰频的KS检验结果. 表5显示, 估计结果与文献[18]结果的平均值及标准偏差是一致的; KS检验结果表明, 总样本(Total)、FSRQ、BL Lac、HBL、IBL和LBL样本的估计结果与文献[18]结果的分布均有较高的同源概率, 分别为20.56%、28.66%、39.12%、73.17%、83.73%、90.92%, 但HCP与LCP样本的同源概率较低, 分别为3.74%和0.20%. 这可能是HCP和LCP样本的峰频分布范围较窄的原因所致.

因此, 我们可以用 γ -ray光子谱指数, 通过方程Eq (Total)快速粗略地估计blazar的逆康普顿峰频. 对于blazar子类样本, 可用方程Eq (BL Lac)和Eq (FSRQ)分别快速粗略地估计BL Lac和FSRQ的逆康普顿峰频; 用Eq (HBL)、Eq (IBL)和Eq (LBL)分别快速较准确地估计HBL、IBL和LBL的逆康普顿峰频. 但HCP和LCP blazar的逆康普顿峰频不能用Eq (HCP)和Eq (LCP)进行估计.

5 结论

本文以4FGL-DR3中的3743个blazar为样本, 从文献中获取了样本源的分类、逆康普顿峰频($\lg \nu_p^{\text{IC}}$)及 γ -ray光子谱指数(Γ). Blazar分类包括光学分类(FSRQ、BL Lac、BCU)、BL Lac按同步峰频的分类(HBL、IBL、LBL)和按逆康普顿峰频的分类(HCP、LCP). 研究了blazar不同子类的逆康普顿峰频与 γ -ray光子谱指数之间的关系, 得到以下结论:

(1)所有blazar子类样本的 $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ 与 Γ 都有强的反相关关系. 表明 γ -ray光子谱指数对blazar的逆康普顿能谱有强的主导作用, γ -ray谱越陡, 逆康普顿峰频越低.

(2)不同的blazar子类样本的逆康普顿部分的能谱分布可能有不同的谱结构函数, 因此, 对不同的样本, 应该采用不同的函数拟合能谱分布.

(3)可以用方程 $\lg \nu_p^{\text{IC}} = -4.40\Gamma + 32.59$ 快速粗略地估计blazar的逆康普顿峰频. 对于blazar子类样本, 可用方程 $\lg \nu_p^{\text{IC}} = -3.97\Gamma + 31.44$ 和 $\lg \nu_p^{\text{IC}} = -4.51\Gamma + 32.82$ 分别快速粗略地估计FSRQ和BL Lac的逆康普顿峰频; 用 $\lg \nu_p^{\text{IC}} = -4.36\Gamma + 32.56$ 和 $\lg \nu_p^{\text{IC}} = -3.88\Gamma + 31.35$ 分别快速较准确地估计HBL和LBL的逆康普顿峰频.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文

章的质量有了显著的提高. 这项研究利用了加州理工学院与美国国家航空航天局合作运营的NED数据库. 我们向他们表示诚挚的感谢!

参 考 文 献

- [1] Ghisellini G, Tavecchio F, Foschini L, et al. MNRAS, 2011, 414: 2674
- [2] Scarpa R, Falomo R. A&A, 1997, 325: 109
- [3] Urry C M, Padovani P. PASP, 1995, 107: 803
- [4] Abdo A A, Ackermann M, Agudo I, et al. ApJ, 2010, 716: 30
- [5] Chen L. ApJ, 2014, 788: 179
- [6] Fossati G, Maraschi L, Celotti A, et al. MNRAS, 1998, 299: 433
- [7] Fan J H, Yang J H, Liu Y, et al. ApJS, 2016, 226: 20
- [8] Paliya V S, Domínguez A, Ajello M, et al. ApJS, 2021, 253: 46
- [9] Beall J H, Bednarek W. ApJ, 1999, 510: 188
- [10] Mannheim K, Biermann P L. A&A, 1992, 253: 21
- [11] 虞满先, 邓进杰, 杨江河, 等. 天文学报, 2020, 61: 23
- [12] Tuo M X, Deng J J, Yang J H, et al. ChA&A, 2020, 44: 428
- [13] Dado S, Dar A. ApJL, 2021, 911: 10
- [14] Giommi P, Ansari S G, Micol A. A&AS, 1995, 109: 267
- [15] Nieppola E, Tornikoski M, Valtaoja E. A&A, 2006, 445: 441
- [16] Nieppola E, Valtaoja E, Tornikoski M, et al. A&A, 2008, 488: 867
- [17] Yang J H, Fan J H, Liu Y, et al. ApJS, 2022, 262: 18
- [18] Yang J H, Fan J H, Liu Y, et al. SCPMA, 2023, 66: 249511
- [19] 张宇涛, 樊军辉. 天文学报, 2019, 60: 7
- [20] Zhang Y T, Fan J H. ChA&A, 2019, 43: 199
- [21] Abdollahi S, Acero F, Baldini L, et al. ApJS, 2022, 260: 53
- [22] 汪胜辉, 杨江河, 樊军辉, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2023, 53: 289811
- [23] Lin C, Fan J H, RAA, 2018, 18: 120
- [24] Arsioli B, Chang Y L. A&A, 2018, 616: 63

The Relationship between the Inverse Compton Peak Frequency and the γ -ray Photon Spectral Index for Blazars

TUO Man-xian^{1,2} YANG Jiang-he^{1,2,3} ZHANG Yue-lian^{1,2} WANG Sheng-hui^{1,2}
NIE Jian-jun^{1,2} FAN Jun-hui³

(1 College of Mathematics and Physics Science, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000)

(2 Hunan Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Information Integration and Optical Manufacturing Technology, Changde 415000)

(3 Center for Astrophysics, Guangzhou University, Guangzhou 510006)

ABSTRACT The relationship between the inverse Compton peak frequency ($\lg \nu_p^{\text{IC}}$) and γ -ray photon spectral index (Γ) for different subclasses of blazars was studied using Fermi/LAT (Large Area Telescope) 4FGL-DR3 (The 4th Fermi Gamma-ray LAT-Data Release 3) blazars as a sample. The results show that: there is a strong negative correlation between $\lg \nu_p^{\text{IC}}$ and Γ for all subclass samples of blazars, indicating that the γ -ray photon spectral index has a strong dominant effect on the inverse Compton spectrum of blazars, and the inverse Compton peak frequency can be quickly estimated using the relationship between them. The energy spectrum distribution (SED) of the inverse Compton emission for different subclass sample of blazars may have different spectral structure functions. Therefore, for different samples, different functions should be used to fit their SED.

Key words galaxies: active, galaxies: nucleus, quasars: general, BL Lacertae objects: general, gamma rays: galaxies, methods: statistical